

隧道开挖过程中的地下水控制技术研究

白周全

四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300

摘 要： 本文深入探讨了隧道开挖过程中的地下水控制技术，详细阐述了地下水对隧道工程的危害，系统分析了降水、堵水、排水等控制技术的原理、方法、适用条件及存在的问题。同时，探讨了超前地质预报在地下水控制中的重要性，以及地下水控制技术的发展趋势，旨在为隧道工程建设中的地下水处理提供全面、深入的理论依据和技术参考，确保隧道施工的安全、高效与质量稳定，减少地下水对隧道及周边环境的不利影响。

关 键 词： 隧道开挖；地下水控制；降水技术；堵水技术；排水技术

Research on Groundwater Control Technology During Tunnel Excavation

Bai Zhouquan

Sichuan Chuanjiao Road and Bridge Co., Ltd. Guanghan, Sichuan 618300

Abstract： This article delves into the groundwater control techniques during tunnel excavation, detailing the hazards posed by groundwater to tunnel engineering. It systematically analyzes the principles, methods, applicable conditions, and existing problems of various control techniques such as dewatering, water plugging, and drainage. Additionally, it explores the significance of advanced geological prediction in groundwater control and discusses the developmental trends of groundwater control technology. The aim is to provide a comprehensive and in-depth theoretical basis and technical reference for groundwater treatment in tunnel engineering construction, ensuring safe, efficient, and quality-stable tunnel construction while minimizing the adverse effects of groundwater on the tunnel and its surrounding environment.

Keywords： tunnel excavation; groundwater control; dewatering technology; water plugging technology; drainage technology

引言

在隧道工程建设中，地下水的存在是一个不可忽视的重要因素。随着隧道开挖深度和长度的不断增加，地下水带来的问题愈发复杂和严峻。有效的地下水控制技术对于保障隧道施工安全、提高工程质量、保护环境以及控制成本具有至关重要的意义。它不仅关系到隧道结构本身的稳定性，还涉及施工过程中的人员安全、设备运行以及周边生态环境的可持续发展。因此，深入研究隧道开挖过程中的地下水控制技术，不断优化和创新控制方法，是当前隧道工程领域的重要课题。

一、地下水对隧道工程的危害

（一）对围岩稳定性的影响

地下水发育洞段围岩一般较破碎，竖向裂隙较发育，降雨入渗后沿裂隙通道往下汇集、排泄；地下水对岩石有一定软化作用，地下水发育洞段岩质一般较软～较坚硬，地下水对裂隙面抗剪强度参数有一定的劣化作用^[1]。一方面，水的浸入会降低岩石的强度，尤其是对于一些软岩，如泥岩、页岩等，其强度降低幅度更为明显。另一方面，地下水在岩石孔隙和裂隙中的流动会产生动水压力，这种压力可能会对围岩产生冲刷作用，带走其中的细小颗粒，导致围岩结构逐渐松散，孔隙率增大，进而降低围岩的整体稳定性。在节理裂隙发育的岩体中，地下水的长期作用可能会引发岩块的滑移、坍塌等现象，严重威胁隧道施工安全。

（二）引发涌水突泥灾害

当隧道开挖遇到富水的断层破碎带、岩溶洞穴等不良地质体时，极有可能引发涌水突泥灾害。这些地质体中储存着大量的地下水，一旦隧道开挖打破了原有的水力平衡，高压地下水会携带泥沙等物质突然涌入隧道^[2]。涌水突泥的发生往往具有突发性和灾难性，不仅会瞬间淹没隧道施工区域，造成施工设备损坏、人员伤亡，还会导致隧道支护结构破坏，严重影响施工进度，甚至可能使整个隧道工程报废。

（三）增加施工难度与成本

地下水的处理需要投入大量的人力、物力和财力，从而增加了施工成本。为了控制地下水，施工过程中需要采取一系列措施，如降水、排水、堵水等，这就需要购置和安装大量的设备，如抽水机、注浆设备等，同时还需要消耗大量的材料，如水泥、

注浆材料等。此外，地下水的存在会使施工环境变得恶劣，如泥泞的工作场地会影响施工机械的正常运行，增加设备故障的概率，降低施工效率，延长施工周期，进一步增加了施工成本。

（四）对周边环境的影响

隧道开挖过程中的地下水控制不当，可能会对周边环境产生多方面的负面影响。大量抽取地下水可能导致地下水位下降，引起地表沉降，影响周边建筑物、道路、桥梁等基础设施的稳定性，甚至可能导致建筑物开裂、倾斜^[3]。地下水的排放如果未经处理，可能会污染地表水和土壤，破坏周边生态平衡，影响植被生长和农业生产。

二、地下水控制技术

（一）降水技术

降水技术的核心原理是通过人为手段降低地下水位，减少地下水对隧道施工的影响。常见的降水方法包括井点降水和深井降水。井点降水是在隧道周围布置一系列井点管，井点管下端通常设置滤管，插入含水层中。通过连接抽水设备，在井点管内形成负压，使地下水在重力和负压的作用下流入井点管，进而被抽到地面，达到降低地下水水位的目的。深井降水则是在隧道附近钻凿深井，深井深度一般根据含水层的深度和厚度确定。深井泵安装在深井底部，直接抽取地下水，其降水深度相对较大，适用于地下水位较深、含水层厚度较大的情况。

降水技术适用于地下水位较高、含水层透水性较好且厚度较大的地层。在砂性土、砾石层等渗透性强的地层中，降水效果较为显著。然而，降水技术也存在一定的局限性。在一些地质条件复杂的地区，如存在多层含水层且各层水力联系复杂时，单纯的降水技术可能难以达到理想的效果^[4]。降水过程中，如果降水速度过快或降水幅度过大，可能会引起周围土体的固结沉降，导致地面不均匀沉降，对周边建筑物和地下管线造成损害。此外，降水技术需要持续运行抽水设备，能耗较大，运行成本较高。

（二）堵水技术

堵水技术主要包括围岩注浆止水和衬砌背后注浆。围岩注浆止水是在隧道开挖前或开挖过程中，针对围岩裂隙、孔隙等渗流通道进行注浆处理。根据注浆范围和方式的不同，可分为超前预注浆、开挖后局部注浆等。超前预注浆是在隧道掌子面前方一定范围内进行注浆，形成止水帷幕，防止地下水涌入开挖区域。开挖后局部注浆则是对开挖后出现涌水的部位进行针对性注浆封堵。衬砌背后注浆是在隧道衬砌施工完成后，对衬砌与围岩之间的空隙进行注浆填充，增强衬砌的防水性能，防止地下水从衬砌背后渗漏进入隧道。注浆材料种类繁多，常见的有水泥浆、水泥-水玻璃双液浆、化学浆液等。不同的注浆材料具有不同的特性，适用于不同的地质条件和工程要求。

在实施堵水技术时，准确掌握注浆参数至关重要。注浆压力、注浆量、注浆时间等参数直接影响注浆效果。注浆压力过小，浆液可能无法有效填充裂隙，导致堵水效果不佳；注浆压力过大，则可能破坏围岩结构，引发新的工程问题。注浆量应根据

围岩裂隙的发育程度、孔隙率等因素进行合理计算和控制。注浆时间的选择也需要考虑围岩的稳定性和施工进度等因素^[5]。注浆孔的布置应根据围岩的地质特征进行优化设计，确保浆液能够均匀地扩散到需要封堵的区域。同时，要注意注浆材料的选择和配比。不同的地质条件和工程要求需要选择不同性能的注浆材料。例如，在富水地层中，可选择凝结速度较快、抗水性强的注浆材料；对于细小裂隙，可选用黏度较低、渗透性好的化学浆液。在注浆过程中，还需要密切关注注浆过程中的各种现象，如注浆压力的变化、注浆量的变化、是否有漏浆现象等，并根据实际情况及时调整注浆参数。

（三）排水技术

隧道排水系统主要由地下水排水系统、路面水排水系统和洞外截排水系统组成。地下水排水系统包括环向排水、边墙纵向排水、底横向排水和中央排水沟。环向排水通常采用软式透水管，如 FH50 软式透水管，沿隧道环向铺设在初期支护与围岩之间，将围岩中的地下水引至纵向排水管。边墙纵向排水采用 HDPE 双壁打孔波纹管，沿隧道边墙底部纵向设置，将环向排水汇集的地下水引向底横向排水。底横向排水同样使用 HDPE 双壁打孔波纹管，将两侧边墙纵向排水的水引入中央排水沟。中央排水沟一般为矩形或梯形断面，采用混凝土浇筑或预制拼装而成，负责将隧道内的地下水排出洞外。路面水排水系统主要由路面两侧的纵向排水浅槽组成，用于排除隧道内路面的积水。洞外截排水系统包括洞外截水沟和排水沟，截水沟设置在隧道洞口上方和周边，拦截地表水，防止其流入隧道；排水沟则将截水沟收集的水引至远离隧道的排水系统。

排水设施的施工质量直接关系到排水效果。在施工过程中，要确保排水管道的坡度符合设计要求，以保证水能够顺利流动。管道连接应牢固、密封，防止漏水。例如，HDPE 双壁打孔波纹管的连接可采用专用的连接管件，确保连接紧密。同时，要注意排水管道的固定，防止在施工过程中管道移位^[6]。在铺设软式透水管时，要保证其与围岩紧密接触，充分发挥排水作用。排水设施的维护也不容忽视。定期对排水系统进行检查，清理排水管道中的杂物、泥沙等，防止堵塞。在雨季来临前，应对排水系统进行全面检查和清理，确保其畅通无阻。对于损坏的排水设施，应及时修复或更换。

三、超前地质预报在地下水控制中的作用

（一）技术方法与应用

超前地质预报是隧道施工过程中的重要环节，对于地下水控制具有关键指导意义。常用的超前地质预报方法包括地质调查法、物探法和钻探法等。地质调查法通过对隧道区域的地质地貌、地层岩性、地质构造等进行详细的调查和分析，初步推断可能存在的地下水情况。物探法利用地震波、电磁波等物理场的变化来探测隧道前方的地质体特征，如 TSP（隧道地震波反射法）、地质雷达等技术可以探测到前方地层中的断层、岩溶洞穴等不良地质体以及地下水的分布情况^[7]。钻探法是最直接的探测方法，通

过在隧道掌子面前方钻孔，获取岩芯样本，直观了解地层岩性、含水层位置和涌水量等信息。

（二）对地下水控制的重要性

超前地质预报能够提前了解隧道前方的地质和水文地质条件，为地下水控制措施的制定提供依据。通过准确预测可能遇到的地下水情况，如涌水量大小、含水层位置等，施工方可以提前准备相应的降水、堵水或排水设备和材料，合理安排施工工艺和进度。在遇到富水地段时，可以提前采取预注浆等堵水措施，防止涌水突泥事故的发生；对于地下水位较高的区域，可以提前规划降水方案，确保施工安全和顺利进行^[9]。超前地质预报还可以帮助优化隧道线路设计，避免穿越地下水治理难度极大的区域，从源头上减少地下水对隧道工程的影响。

四、地下水控制技术的发展前景

（一）智能化监测与预警

随着信息技术与传感器技术的迅猛发展，智能化监测与预警系统在隧道地下水控制领域正发挥着日益关键的作用。在隧道内部精心布置高精度传感器网络，可实时精准获取地下水位、水压、围岩变形、渗流量等关键参数，并即时传输至监控中心。借助大数据分析和人工智能算法，对监测数据展开实时处理与深度剖析。例如，运用先进算法建立地下水渗流模型，紧密结合实时监测数据，能够有效预测涌水突泥的可能性及发生时间，进而提前谋划防范举措，大幅提升隧道施工的安全性及可靠性，为隧道工程的顺利推进提供坚实保障。

（二）环保型技术创新

未来的地下水控制技术将更加注重环境保护。一方面，研发和应用环保型注浆材料，减少传统注浆材料中有害物质对地下水环境的污染。例如，开发可生物降解的注浆材料，在完成堵水功能后能够自然分解，降低对地下水水质的长期影响。另一方面，

优化排水系统设计，实现水资源的回收利用^[9]。例如，对隧道排出的地下水进行处理后，用于施工现场的降尘、设备冷却等，提高水资源的利用率，减少对周边水资源的依赖，降低隧道施工对环境的负面影响。

（三）多学科融合与优化

地下水控制技术将与地质学、力学、材料学、环境科学等多学科进行深度融合。通过跨学科研究，综合考虑地质条件、力学原理、材料性能和环境影响等因素，优化地下水控制方案。例如，结合地质力学理论，更准确地分析地下水对围岩稳定性的影响，制定更合理的支护和堵水措施；利用新型材料的特性，开发高性能的防水衬砌材料和注浆材料，提高隧道的防水性能和耐久性^[10]。同时，多学科融合还将促进地下水控制技术与隧道施工全过程的紧密结合，实现从设计、施工到运营的一体化优化。

五、结束语

隧道开挖过程中的地下水控制技术是一个复杂而系统的工程，涉及多个学科领域和技术环节。地下水对隧道工程的危害是多方面的，包括影响围岩稳定性、引发涌水突泥灾害、增加施工难度与成本以及对周边环境造成影响等。降水技术、堵水技术和排水技术是控制地下水的主要手段，各有其原理、方法、适用条件和局限性。在实际应用中，需要根据隧道的具体地质和水文地质条件，合理选择和组合这些技术，以达到最佳的地下水控制效果。超前地质预报在地下水控制中起着重要的指导作用，能够为施工提供前瞻性信息，保障施工安全。通过不断的技术创新和改进，提高隧道地下水控制水平，确保隧道工程的安全、高效建设，同时实现环境保护和可持续发展的目标。在隧道工程建设中，应充分重视地下水控制技术的研究与应用，不断总结经验，推动行业技术进步。

参考文献

[1] 刘金洋, 胡政. 花岗岩风化-裂隙-地下水相互作用对隧道围岩稳定性的影响研究 [J]. 交通节能与环保, 2020, 16(05): 133-137.
[2] 吕玉香. 西南典型岩溶槽谷隧道开挖引起的地下水流场变化及控制机理 [D]. 西南大学, 2022.
[3] 李小东, 田明, 张艳. 小型水工隧洞施工技术探讨 [J]. 河南水利与南水北调, 2017, 46(10): 53-54.
[4] 廖翔, 张杰青, 汪彪, 等. 临江高水位涉京广线基坑工程地下水控制设计 [J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(S1): 265-272.DOI: 10.20174/j.juse.2024.S1.32.
[5] 李瑞杰. 地下水环境监测技术的应用及质量控制措施探究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(16): 38-40.DOI: 10.20025/j.cnki.CN10-1679.2024-16-13.
[6] 曲延光, 温宝玉, 韩京龙, 等. 地下水超采区埋深控制指标确定方法的探讨 [J]. 吉林水利, 2024, (08): 28-32.DOI: 10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2024.08.005.
[7] 王子河, 金婧, 刘伟, 等. 土默川平原黄灌区地下水化学控制因素来源分析 [J]. 内蒙古水利, 2024, (S2): 1-2+12.
[8] 田苗社. 南水北调地下水回补对潮白河冲洪积扇中上部地表形变响应及控制因素 [J]. 地质论评, 2024, 70(04): 1571-1586.DOI: 10.16509/j.georeview.2024.01.005.
[9] 刘聪丽, 刘飞, 甄品娜, 等. 河北典型压采区地下水水化学变化特征及控制因素 [J/OL]. 环境科学, 1-18[2024-12-13].https://doi.org/10.13227/j.hjks.202403259.
[10] 刘志刚. 隧道施工期间地下水控制的技术策略 [J]. 工程与建设, 2024, 38(03): 497-498+551.